ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 23, 2009

УДК 622.691.4.002.5

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТІВ В СТІНКАХ ТРУБОПРОВОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ СПРЯМОВАНИМИ КІЛЬЦЕВИМИ ХВИЛЯМИ

І. З. Лютак

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (8-03422) 4-60-77

Проведено лабораторні дослідження методу контролю дефектів в стінках трубопроводів великого діаметру ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями. Встановлено результативність вказаного методу, що доказано представленими експериментальними результатами аналізу луно-сигналу відбитого від дефектів. Для проведення досліджень представлено розраховані дисперсні параметри ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль.
Ключові слова: трубопровід, ультразвук, контроль, дефект, спрямована кільцева хвиля, хвильове число, дисперсія, лабораторні експериментальні дослідження, сегмент труби.

Проведены лабораторные исследования метода контроля дефектов в стенках трубопроводов большого диаметра ультразвуковыми направленными кольцевыми волнами. Установлено результативность указанного метода,что доказано представленными экспериментальными результатами анализа эхо-сигнала отраженного от дефектов. Для проведения исследований представлены, рассчитаные дисперсные параметры ультразвуковых направленных кольцевых волн.
Ключевые слова: трубопровод, ультразвук, контроль, дефект, направлена кольцевая волна, волновое число, дисперсия, лабораторные экспериментальные исследования, сегмент трубы.

It is fulfilled the laboratory research of control of defects in the walls of pipes of large diameter by ultrasonic circumferential waves. Established effectiveness of a specific method that proved presented experimental results of the analysis signal along with the echoes reflected from defects. For the research presented calculated dispersion parameters of ultrasonic circumferential waves.
Keywords: pipeline, ultrasound, control, defect, directed circular wave, wave-number, dispersion, laboratory experimental researches, segment of pipe.

Розроблення нових методів неруйнівного контролю трубопроводів на основі застосування ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль дозволяє підвищити достовірність результатів та швидкодію контролю. Для застосування ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль необхідно розробити математичну модель поширення цих хвиль та провести лабораторні дослідження з метою перевірки теоретичних результатів.

Основи теоретичних досліджень поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль закладені І.Вікторовим [1]. Він ввів поняття кутового хвильового числа, що характеризує параметри поширення цих хвиль в криволінійному середовищі. В Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу проводяться дослідження параметрів кільцевих хвиль, розроблено методи неруйнівного контролю дефектів в стінках трубопроводів [2-4].

Метою даного дослідження є експериментальне підтвердження розробленого методу неруйнівного контролю дефектів стінок нафтогазопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями.

Для проведення лабораторних досліджень вибрано сегмент труби діаметром 1020 мм та товщиною 16 мм. Математична модель, що описує дисперсні властивості поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, є такою [5, 6]:

$$\begin{cases} \Phi = \Gamma_1 J(k_l r) + \Gamma_2 Y(k_l r), \\ \Psi = \Gamma_3 J(k_t r) + \Gamma_4 Y(k_t r), \end{cases} \quad (1)$$

де Γ_1, Γ_2 – амплітуди поздовжніх ультразвукових хвиль; Γ_3, Γ_4 – амплітуди поперечних ультразвукових хвиль; k_l та k_t – відповідно хвильові числа для поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль; r – координата циліндричної системи координат; Ф, Ψ – відповідно амплітуди коливань симетричної та антисиметричної мод спрямованих кільцевих хвиль; J, Y – функції Бесселя.

При описі поширення ультразвукових хвиль

(1) в стінці труби, враховуючи дві границі розділу середовища ззовні та всередині труби, отримаємо систему із 4-х рівнянь. Кожне рівняння описує поширення об'ємної хвилі у стінці труби утвореної відбиттям від границь розділу чотирьох хвиль: двох поздовжніх та двох поперечних. Розв'язок такої системи рівнянь буде описувати поширення ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі. Для обчислення отриманої системи рівнянь розглянемо випадок поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в металі стінки труби, яка є оточена повітрям. Це дозволить знехтувати явищем поширення частини хвильової енергії в напівпростори, що оточують стінки труби, оскільки густина повітря є набагато меншою, ніж сталі:

$$\begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} & \Lambda_{14} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} & \Lambda_{23} \\ \Lambda_{31} & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} & \Lambda_{34} \\ \Lambda_{41} & \Lambda_{42} & \Lambda_{43} & \Lambda_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \\ \Gamma_4 \end{pmatrix} = 0, \qquad (2)$$

$$\Lambda_{ij} = F(\omega, r, k_t, k_l),$$

де Λ_{ij} – члени характеристичної матриці, що описує поширення об'ємних поздовжніх та поперечних хвиль; ω – частота.

Система (2) дає представлення про спосіб взаємодії об'ємних ультразвукових хвиль у випадку утворення спрямованої кільцевої хвилі. Члени характеристичної матриці, які відповідають за зміну хвильових параметрів в просторі при поширенні хвилі змінюються при однаковій частоті в залежності, від взаємодії відбитих хвиль від границь розділу. Про це свідчить їх залежність від хвильового числа та координати *r*. Проте амплітуди об'ємних хвиль Γ_i не входять в частину характеристичної матриці і не залежать від геометричних форм середовища поширення, що повністю узгоджується із теорією ультразвуку.

Розв'язок (2) реалізовано за допомогою розробленої програми в середовищі Matlab у вигляді залежності кутового хвильового числа від частоти (рис. 1). При проведенні розрахунків крок кутового хвильового числа дорівнював 2, що дозволяє точно отримати форму дисперсних кривих.

Алгоритм пошуку коренів (2) реалізовано методом поділу відрізка. Це з одного боку збільшує час отримання розв'язку у порівнянні з більш ефективнішими алгоритмами, проте забезпечує стабільність. Забезпечення стабільності розв'язку є більш важливим завданням, оскільки при проведенні операцій ділення у (2) для великих діаметрів трубопроводів окремі компоненти матриці можуть досягати значень, що перевищує 10^{100}.

Дисперсія кутового числа ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль (рис. 1) надає необхідну інформацію для збудження окремих мод цих хвиль ультразвуковими первинними перетворювачами. Найбільш ефективно мода ультразвукової спрямованої хвилі в стінці труби збуджується в тому випадку, коли хвильове число об'ємної ультразвукової хвилі, яка падає на межу розділу середовищ контактний шар – метал стінки труби буде дорівнювати хвильовому числу спрямованої хвилі, представленому на рис. 1. Це досягається кутом нахилу ультразвукового первинного перетворювача таким чином, щоб хвильове число падаючої хвилі на поверхню стінки труби дорівнювало хвильовому числу спрямованої кільцевої хвилі. Обчислити кут нахилу первинного перетворювача можна на основі закону Снеліуса:

$$k_c \sin(\theta_c) = k_n \sin(\theta_n), \qquad (3)$$

де k_c – хвильове число спрямованої кільцевої хвилі, k_n – хвильове число падаючої об'ємної хвилі, θ_c – кут нахилу поширення спрямованої кільцевої хвилі, θ_n – кут поширення об'ємної хвилі.

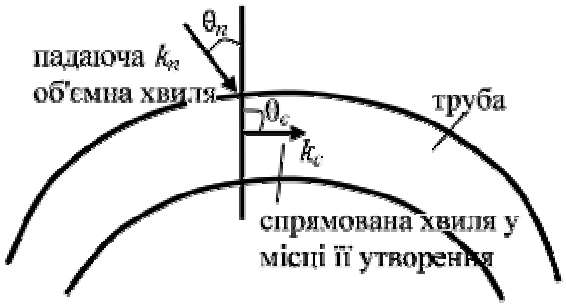


Рисунок 1 – Спосіб утворення ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в стінці труби від падаючої об'ємної хвилі

Кут поширення θ_c ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі утворений хвильовим числом у точці її утворення дорівнюватиме 90° (рис. 1). Це визначається її хвильовими властивостями поширюватись паралельно до дотичної до стінки труби. Із (3) кут нахилу первинного перетворювача для генерування спрямованої кільцевої хвилі буде таким:

$$\theta_n = \arcsin(k_c / k_n). \qquad (4)$$

Форма результатів обчислення дисперсних параметрів спрямованих кільцевих хвиль (рис. 2) не дозволяє побачити зміну фазової та групової швидкостей їх поширення. Для цього необхідно провести додаткові обчислення [5]:

$$c_{ф} = \omega / k_{\theta} \,,\; c_{гр} = d\omega / dk_{\theta} \;, \qquad (5)$$

де $c_{ф}$, $c_{гр}$ – відповідно фазова та групова швидкості ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі; k_{θ} – хвильове кутове число.

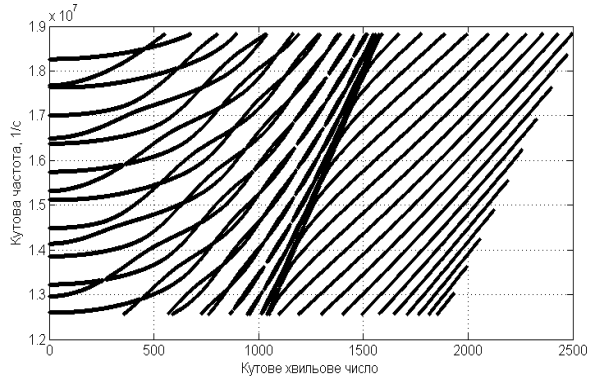


Рисунок 2 – Дисперсія кутового числа ультра звукових спрямованих кільцевих хвиль для труби ∅ 1020 мм товщиною стінки 16 мм

Результати розв'язку (3) представлені на рис. 3 та рис. 4.

На рис. 2 моди, що зображені справа, не представлені на всій частотній осі. Це пов'язано із нестабільністю числового розв'язку, при якому відбувалось переповнення максимального числа в пакеті математичних програм Matlab. Для побудови дисперсій мод на всій частотній осі їх апроксимували квадратичним рівнянням.

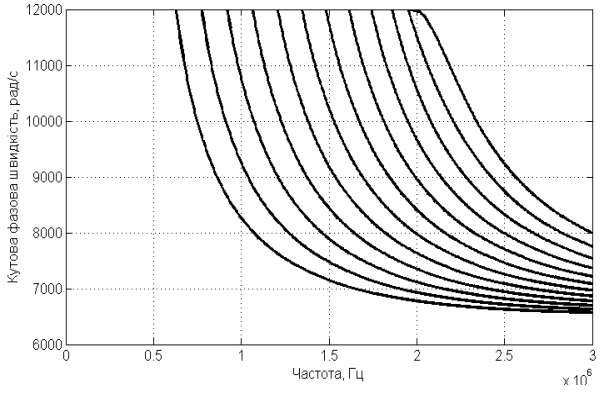


Рисунок 3 – Дисперсія фазових швидкостей ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль для труби ∅ 1020 мм товщиною стінки 16 мм

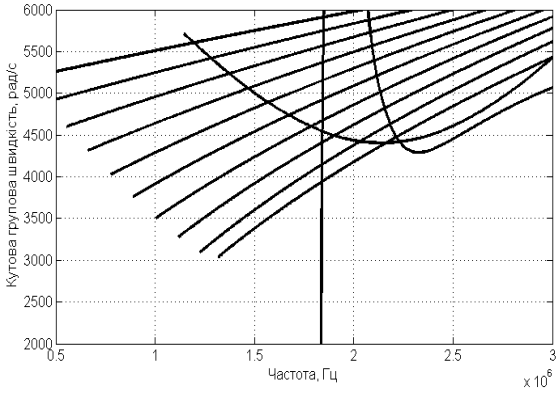


Рисунок 4 – Дисперсія групових швидкостей ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль для труби ∅ 1020 мм товщиною стінки 16 мм

Як можна побачити із рис. 3, в розрахованій множині мод є моди, що з'являються тільки від певного значення частоти. При менших значеннях частоти їх фазова швидкість прямує до нескінченності, а хвильова енергія до нуля. Мінімальна частота окремо взятої моди ультразвукової спрямованої хвилі, на якій величина її хвильової енергії є достатньою для генерування та реєстрації системою контролю, назвемо початковою частотою моди.

Як можна побачити із рис. 3, використання мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль на відрізку фазових швидкостей [7000 – 8000] рад/с при частоті 2,5 МГц є недоцільним, оскільки там є значна нелінійність дисперсії швидкості.

Дисперсія групових швидкостей ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль (рис. 4) дозволяє отримати числові значення швидкості поширення хвильових пакетів мод, що дає можливість визначити віддаленість дефекту від первинного перетворювача шляхом аналізу часу приходження луно-імпульсу. Вертикальна крива, що належить моді спрямованої кільцевої хвилі вищого порядку, показує ділянку дисперсної кривої, в якій напрям фазової та групової швидкості не співпадають. Така особливість неспівпадання напрямку групової та фазової швидкостей не належить виключно представленій моді. Із збільшенням порядкового числа мод спрямованих кільцевих хвиль кількість вертикальних складових буде збільшуватись.

При проведенні лабораторних досліджень генерування ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль та їх взаємодії з дефектом в сегменті труби (рис. 5) забезпечувались такі вимоги:

1) температура металу на поверхні об'єкту контролю і навколишнього середовища знаходилась в діапазоні від -10°С до + 40°С;

2) сегменти труби в зоні контролю були очищені від бруду та прошліфовані від нерівностей по всій довжині ділянки контролю;

3) частота ультразвукових первинних перетворювачів була рівною 2,5 МГц;

4) в якості контактної речовини використано машинне масло.

Генерування ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль здійснюватися розробленою системою контролю труб КТУ-1. Для кріплення первинного перетворювача було розроблено пристрій (рис. 6), особливістю якого є те, що воно дозволяє фіксувати кут нахилу давача. Це дозволяє точно проводити повторні вимірювання.

Згенеровані ультразвукові спрямовані кільцеві хвилі досить чітко спостерігались при проведенні лабораторних досліджень. Генерування та реєстрація кільцевих хвиль здійснювались двома первинними перетворювачами.

Застосування кільцевих хвиль для виявлення дефектів було здійснено для штучно виготовлених отворів у дослідному сегменті труби діаметром 6 мм (рис. 7). Отримання луно-сигналів від дефектів здійснювалось одним і двома первинними перетворювачами. Було встановлено, що більш чистий сигнал із малими завадами було отримано при застосуванні двох давачів.

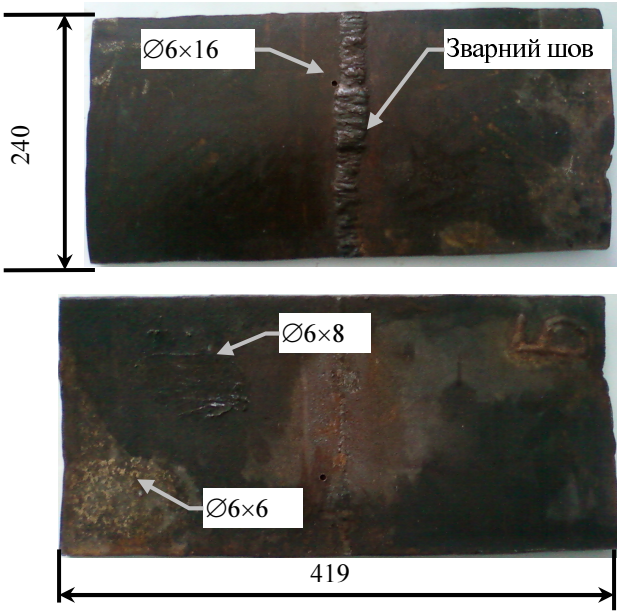


Рисунок 5 – Сегмент труби ∅ 1020 мм товщиною 16 мм



Рисунок 6 – Проведення лабораторних досліджень

Як можна побачити із рис. 7, луно-сигнал спрямованої кільцевої хвилі, відбитий від дефекту, має велику амплітуду і є досить виокремленим від завад. Це дозволяє стверджувати про перспективність застосування контролю дефектів спрямованими кільцевими хвилями.

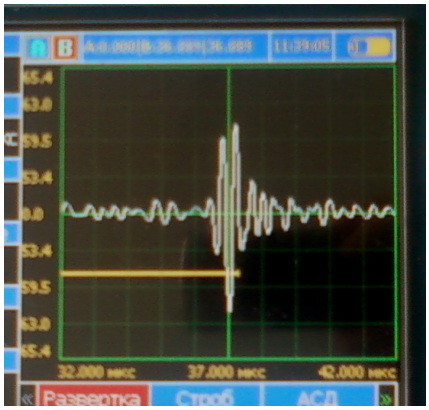


Рисунок 7 – Луно-сигнал ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі від дефекту ∅6×16

Для перевірки можливості контролю підповерхневих дефектів було проведено дослідження трьох отворів (рис. 5). Результати контролю приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати контролю дефектів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями

Діаметр дефекту, мм	Відстань первинного перетворювача до дефекту, мм	Максимальна амплітуда луно-сигналу від дефекту, дБ
6	30	71,9
6	100	65,7
6	170	52,8

ВИСНОВКИ

Результати лабораторних випробувань дозволяють стверджувати про повторність показів контролю дефектів експериментального зразка сегменту труби, що підтверджує теоретичні дослідження ефективності застосування ультразвукових кільцевих спрямованих хвиль в неруйнівному контролі.

Подальші дослідження необхідно проводити в напрямку збільшення точності контролю.

1. Викторов И. А.. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. / И. А. Викторов. - М.: Наука.- 1966.- 168 с. 2. Лютак І. З. Моделювання методом кінцевих елементів поширення нульових мод плоских хвиль Лемба в пластині з ортотропними механічними властивостями / І.З. Лютак // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. - № 6. т. 1. – С. 151-156. 3. Лютак З. П. Визначення напружено-деформованого стану газопроводів за допомогою ультразвукових хвиль Лемба / З. П. Лютак, А. А. Мандра // Методи та прилади контролю якості. – 2004. - № 12. – С. 24-29. 4. Лютак І. З. Контроль технічного стану магістральних трубопроводів кільцевими модами пластинчатих ультразвукових хвиль / І.З. Лютак // Збірн. наук.праць : серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій ; Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2008. – Вип. 13.- С. 193-198. 5. Лютак І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот / І.З. Лютак // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. – 2009. – № 2. – С. 30-35. 6. Fast techniques for calculating dispersion relations of circumferential waves in annular structures / J. Fong, M.J.S. Lowe, D. Gridin, R.V. Craster // Review of Progress in Quantitative NDE :American Institute of Physics.- 2003.- № 22.- P. 213-220.

Поступила в редакцію 02.12.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М.